

808 nm 半导体分布反馈激光器的光栅设计与制作

班雪峰^{1,2}, 赵懿昊³, 王翠鸾¹, 刘素平¹, 马骁宇^{1,2*}

- (1. 中国科学院半导体研究所 光电子器件国家工程中心, 北京 100083;
2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049;
3. 北京丹华科技发展有限公司, 北京 100190)

摘要: 半导体分布反馈(DFB)激光器的核心工艺之一是分布反馈光栅的制作, 设计了 808 nm DFB 激光器的一级光栅结构。利用纳米压印技术与干法刻蚀附加湿法腐蚀制作了周期为 120 nm 的梯形布拉格光栅结构, 使用 MATLAB 和 Pics3D 软件模拟了一次外延结构的光场分布和能带图。通过优化湿法腐蚀所用腐蚀液各组分比例、腐蚀温度、腐蚀时间等条件, 得到了理想的湿法腐蚀工艺参数。扫描电子显微镜表征显示, 光栅周期为 120 nm, 光栅深度约为 85 nm, 占空比约为 47%, 光栅边缘线条平直, 表面平滑, 周期均匀。创新型的引入湿法腐蚀工艺和腐蚀牺牲层使光栅表面的洁净度得到保证, 提高了二次外延质量的同时, 也为进一步制作 DFB 激光器高性能芯片奠定了良好的基础。

关键词: 半导体激光器; 分布反馈; 一级光栅; 纳米压印; 干法刻蚀; 湿法腐蚀
中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1105003

Design and preparation of grating for 808 nm semiconductor distributed feedback laser

Ban Xuefeng^{1,2}, Zhao Yihao³, Wang Cuiluan¹, Liu Suping¹, Ma Xiaoyu^{1,2*}

- (1. National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. College of Materials Science and Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Danhua Technology Development Co., Ltd, Beijing 100190, China)

Abstract: One of the core processes of semiconductor distributed feedback lasers was the fabrication of distributed feedback gratings, and the first-order Bragg grating structure of 808 nm distributed feedback semiconductor was designed. A trapezoidal grating structure with a period of 120 nm was fabricated by using nanoimprint technology combined with process of dry etching and wet etching. The optical field distribution and energy band diagram of epitaxial structure were simulated using MATLAB and Pics3D software. The ideal wet etching process parameters were obtained by optimizing the proportions of corrosion components used in wet etching, corrosion temperature and corrosion time. The scanning electron microscopy measurement shows that the grating has a period of 120 nm, depth about 85 nm, duty cycle about 47%, and the grating has the advantages of straight edges, smooth surface and even period. The innovative introduction of the wet etching process and the corrosion sacrificial layer ensures

收稿日期: 2019-07-11; 修订日期: 2019-08-21

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(6142405041803)

作者简介: 班雪峰(1993-), 男, 博士生, 主要从事大功率半导体激光器方面的研究。Email: banxuefeng@semi.ac.cn

导师简介: 马骁宇(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大功率半导体激光器方面的研究。Email: maxy@semi.ac.cn

the cleanliness of the grating surface, improves the secondary epitaxial quality, which lays a good foundation for the further production of high-performance chips for distributed feedback lasers.

Key words: semiconductor laser; distributed feedback; first-order grating; nanoimprint; dry etching; wet etching

0 引言

由于 808 nm 大功率半导体激光器具有体积小、寿命长及效率高等优点,在固体激光器、光纤激光器以及放大器^[1-2]的泵浦中得到了广泛的应用。传统结构的法布里-珀罗半导体激光器存在以下缺点:光谱宽度比较宽、波长稳定性差、单模性不好等等,而被泵浦的器件比如固体激光器中的掺杂离子吸收峰谱宽只有几个纳米^[3],所以窄线宽、波长稳定的泵浦源在应用中存在特别大的需求量。为了实现泵浦源半导体激光器的窄线宽和稳定波长输出,最有效的一种方法就是在半导体激光器中内置布拉格光栅,利用布拉格光栅的周期性结构实现光的分布反馈,激光器内部传输的光只有满足布拉格条件的才能形成稳定的光振荡,所以分布反馈(DFB)激光器的输出光谱被压窄,正是由于布拉格光栅的存在,激光器的波长随温度和电流的变化相对稳定。

制作 DFB 激光器的关键技术之一就是制作分布反馈布拉格光栅。光栅制作一般分两步:光栅掩膜的制作和光栅沟槽的刻蚀。光栅掩膜的制作^[4-6]可以采用电子束曝光、全息光刻或者纳米压印等技术,光栅沟槽的刻蚀方法有湿法腐蚀和干法刻蚀。近年来,国内外很多学者对分布反馈布拉格光栅进行了分析和研究。2006 年, Fu 等^[7]采用全息光刻的方法成功制备了周期为 244 nm 的二级光栅,并得到了输出波长为 820 nm,斜率效率为 0.32 mW/mA 性能极好的激光器。2009 年,美国 Alfalight 公司^[8]报道了波长为 808 nm 的 DFB 激光器,采用周期为 244 nm 的二级光栅,取得了温漂系数为 0.062 nm/°C、转换效率为 57% 的突破。2010 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的戚晓东等^[9]指出依靠曲线光栅的特殊衍射特征,可以获得窄线宽、小发散角、高亮度和大功率的激光。2012 年,德国 FBH 研究所 C. M. Schultz 等^[10]利用光学纳米结构制作分布反馈

光栅,该光栅在激光器中不会引入额外的内部损耗和串联电阻,得到了输出光功率大于 12 W,转换效率大于 60% 的优良性能。2017 年, J Fricke 等^[11]将带有表面切趾光栅(Apodized Surface Gratings)的 DFB 激光器用于实现波长稳定和高效,这是第一次将切趾光栅应用于大功率半导体激光器。笔者所在的课题组^[12-13]多次利用纳米压印的方法制备分布反馈光栅,得到性能良好的 DFB 激光器。在光栅制作中,纳米压印技术和干法刻蚀相结合具有很大的优越性,因为电子束光刻技术适用于小尺寸光刻而且成本昂贵;全息光刻难以保证光刻边缘的平直性,制作出的光栅边缘可能存在毛刺;而湿法腐蚀各向同性的特点使得侧蚀难以控制,会严重影响光栅形貌。另一方面,在光栅沟槽刻蚀中存在的一个难题是刻蚀过程中产生的聚合物容易吸附在光栅表面,这些聚合物的存在使得之后的二次外延质量会受到很大的影响,而且由此带来的器件内部的缺陷也会影响阈值电流和输出功率等参数。

针对以上所遇到的问题,文中在常规的纳米压印与干法刻蚀制备光栅的基础上增加了一层牺牲层,采用湿法腐蚀与干法刻蚀的方法制备了一种周期为 120 nm 的表面平滑的新型光栅。

1 光栅的设计

对于 808 nm DFB 激光器来说,发光波长主要由布拉格光栅对应的波长来决定,满足公式(1):

$$\lambda_0 = \frac{2\Lambda n_{\text{eff}}}{m} \quad (1)$$

式中: λ_0 为输出光的中心波长; Λ 为布拉格光栅的周期; n_{eff} 为有效折射率; m 为一个正整数,表示布拉格光栅的级数。由激光材料及其结构参数的实验数据得到 808 nm DFB 激光器的有效折射率约为 3.25,则二级布拉格光栅的周期为 240 nm,一级布拉格光栅的周期为 120 nm。为增大光栅对激光器激励激光的耦合作用,一般选择激光器腔长与光栅耦

合系数的乘积耦合强度为 1^[14], 即:

$$\kappa L = 1 \tag{2}$$

式中: κ 为光栅耦合系数; L 为激光器腔长。在 DFB 激光器中, 对于一级的梯形光栅来说, 耦合系数可以表示为^[15]:

$$\kappa = \frac{k_0^4}{4\beta\beta_x} \frac{\left(\left| \int_0^{d_g} A_1(x) u(x) \times \exp(i\beta_x x) dx \right|^2 \right)}{\int_{-\infty}^{\infty} u(x)^2 dx} \tag{3}$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为真空波长; β 为模式传播波数; β_x 为 x 方向的传播波数; d_g 为光栅沟槽深度; $A_q(x)$ 为傅里叶系数, q 取 1, 2。 $A_q(x)$ 与光栅和光栅覆盖层的材料折射率以及光栅的形状函数有关, 将不同形状的光栅相对应的形状函数带入其中即可得到具体的耦合系数表达形式。

图 1 为光栅相对耦合系数随光栅占空比的变化曲线, 图中的实线为一级光栅相对耦合系数与占空比的函数关系, 虚线为二级光栅相对耦合系数与占空比的函数关系。对于一级光栅来说, 当光栅占空比为 0.5 时光栅耦合强度最大; 而二级光栅的占空比为 0.5 时耦合强度最小, 占空比为 0.25 和 0.75 时耦合强度最大, 因此在制作光栅时一定要保证形貌和周期的精确, 选择纳米压印工艺制作光栅在这些方面都有很高的可靠性。而且占空比条件相同时一级光栅耦合强度比二级光栅大很多, 所以选择制备一级光栅。

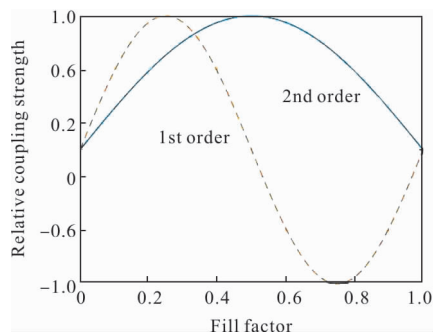


图 1 光栅相对耦合系数随光栅占空比的变化曲线

Fig.1 Curve of relative coupling coefficient of grating with grating duty cycle

图 2 为光栅耦合系数随光栅深度的变化曲线, 图中实线为占空比为 25%时光栅耦合系数和光栅深度的函数关系, 虚线为占空比为 50%时光栅耦合系

数和光栅深度的函数关系。光栅深度越大, 光栅耦合系数也越大, 即光栅耦合强度越大, 反馈作用越强。但并不是耦合强度越大越好, 对于大功率半导体激光器而言, 要充分考虑输出功率的重要性。耦合系数过大就会产生空间烧孔效应影响激光器的激射特性; 耦合系数太小, 激光器的谐振腔损耗增大, 激光器的阈值电流会变大。综上所述, 最终确定采用周期为 120 nm 的一级光栅, 占空比为 50%左右, 光栅刻蚀深度为 70 nm 左右。

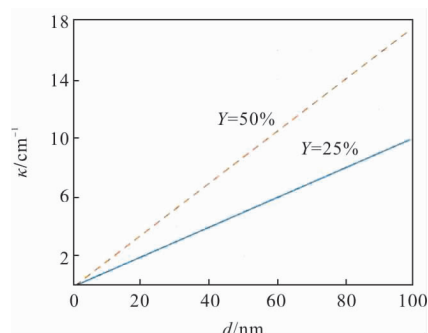


图 2 光栅耦合系数随光栅深度的变化曲线

Fig.2 Grating coupling coefficient as a function of grating depth

2 外延生长及光栅制作

该实验的 DFB 外延片是由金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法生长的, 并且采用二次外延的方法来制备布拉格内置光栅, 一次外延生长了 1000 nm 的下限制层, 200 nm 的下波导层, 210 nm 的 n-AlGaAs 折射率渐变层, 9 nm 的 AlGaInAs 的量子阱, 110 nm 的 p-AlGaAs 折射率渐变层, 30 nm 的上波导层, 35 nm 的 p-InGaAsP 和 35 nm 的 p-GaInP 组成了光栅层, 最后生长 10 nm 的 GaAs 作为之后湿法腐蚀的牺牲层, 牺牲层的材料选择的根据是在实验过程中发现湿法腐蚀工艺中所用到的腐蚀液对 GaAs 的腐蚀速率远远大于 InP 系的材料。牺牲层在腐蚀过程中被迅速腐蚀掉, 保证湿法腐蚀之后光栅顶部表面的洁净度, 为二次外延做准备, 一次外延结构图如图 3 所示。

利用 Pics3D 软件模拟一次外延结构的光场分布和能带图, 如图 4 所示, 这证明上述设计的外延结构是可行的, 保证了出光质量, 光场几乎全部分布在有源层附近。

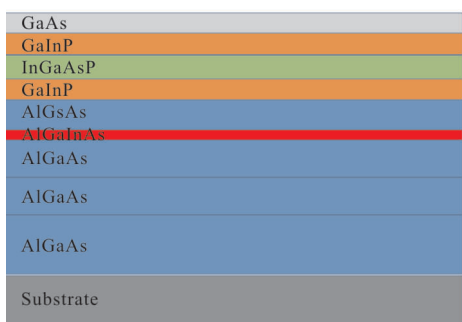


图 3 一次外延结构图

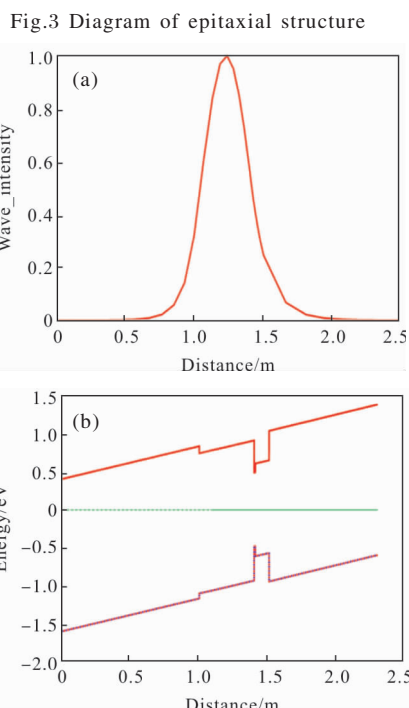


图 4 一次外延结构的光场分布和能带图

Fig.4 Optical field distribution and energy band diagram of epitaxial structure

一次外延之后在外延片上生长一层厚度合适的二氧化硅,作为干法刻蚀的牺牲层,旋涂压印胶,利用紫外压印设备来制备光栅掩膜。刻蚀采用的是耦合感应等离子体(ICP)干法刻蚀技术,通过优化气体配比,采用碳氢基气体,即 $CH_4/H_2/Ar$ 的混合气体进行干法刻蚀,刻蚀出的光栅用扫描电镜表征如图 5 所示,光栅图形为三角形是因为刻蚀深度为 70 nm 左右,刻蚀的材料不同,刻蚀所用的气体为同一种,同一气体对不同材料的物理和化学作用不同从而刻蚀速度不同而造成的。干法刻蚀完成后用氢氟酸溶液去掉表面残余的二氧化硅,再用浓硫酸、双氧水和水的混合溶液腐蚀外延片 20 s,得到如图 6 所示最

终的梯形光栅图形。梯形光栅形貌产生的原因是因为湿法腐蚀中腐蚀液对 InGaAsP 的腐蚀速率比 GaInP 快,多被腐蚀掉的 InGaAsP 层形成了光栅沟槽侧面的“小沟”。在经过光栅表面的清理之后,利用 MOCVD 设备进行二次外延生长,完成芯片的制备。

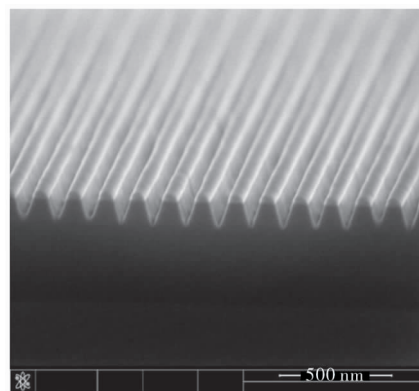


图 5 干法刻蚀后的光栅图形

Fig.5 Shape of grating after dry etching

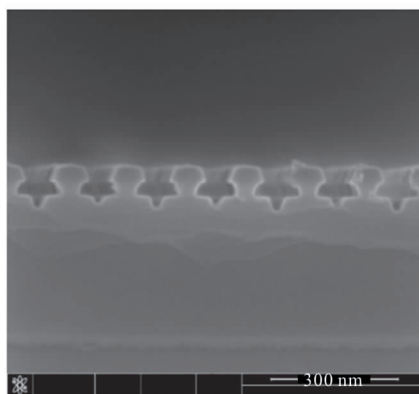


图 6 湿法腐蚀后的光栅图形

Fig.6 Shape of grating after wet etching

3 结果与讨论

3.1 浓硫酸对腐蚀结果的影响

湿法腐蚀所用的腐蚀液中各组分的比例对光栅的腐蚀形貌有很大影响。浓硫酸和双氧水对镓砷材料有氧化加去氧化作用,因此浓硫酸和双氧水在腐蚀液中的比例多少对腐蚀快慢影响巨大。其他工艺参数保持不变的条件下,不同比例的浓硫酸对光栅的腐蚀结果如图 7 所示,浓硫酸比例小,腐蚀速率慢,牺牲层没有完全腐蚀,造成光栅表面不光滑,严重影响后续二次外延工艺的质量,并且会增加器件的内部损耗,见图 7(a)3:1:20;浓硫酸比例过大,腐蚀

速率过快难以控制,会使光栅条宽过窄,甚至光栅坍塌,严重影响周期性和占空比,见图 7(b)6:1:20。

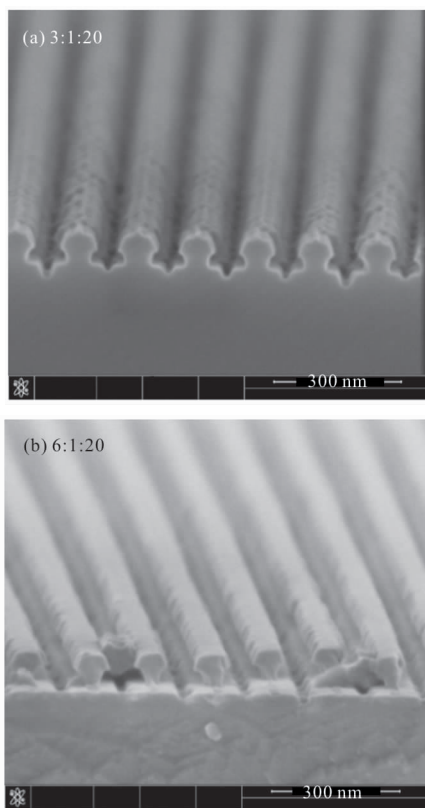


图 7 两种浓硫酸比例不同的腐蚀液作用下的光栅图形
Fig.7 Shape of grating under the action of two corrosive liquids with different ratios of concentrated sulfuric acid

3.2 双氧水对腐蚀结果的影响

双氧水和水的配比在湿法腐蚀工艺中起到稀释和抛光的作用,合适比例的双氧水和水可以使光栅表面光滑平整,减少毛刺。图 8(a)3:2:20 所示光栅边缘线条模糊,无法分辨光栅的具体形状,重复性很差;图 8(b)6:1:40 降低了双氧水的比例,光栅边缘线条变得清晰平直,光栅平滑均匀。合适比例的双氧水

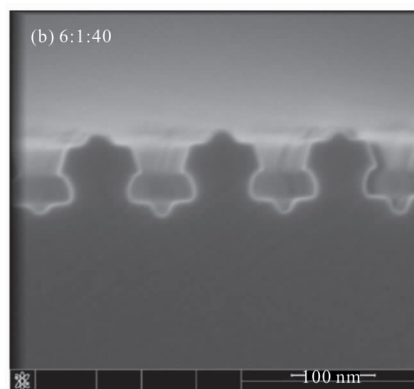
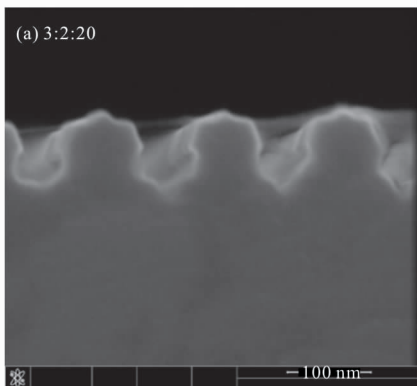


图 8 两种双氧水与水比例不同的腐蚀液作用下的光栅图形
Fig.8 Shape of grating under the action of two corrosive liquids with different ratios of hydrogen peroxide to water

在湿法腐蚀中拥有良好的抛光作用,对光栅的平滑度和周期性有很大的影响。

3.3 优化结果

经过多次实验总结和资料对比,优化腐蚀液各组分比例、腐蚀温度、时间等条件,最终确定的腐蚀条件是:腐蚀液中 $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ 的比例为 4:1:20,腐蚀温度为 $0^\circ C$ 的冰浴,腐蚀时间为 20 s。得到了如图 9 所示形貌优良的光栅,光栅周期为 120 nm,光栅深度约为 85 nm,占空比约为 47%。光栅边缘线条平直,表面平滑,周期均匀。由于光栅图形比较新颖,笔者将二次外延后的外延片取样进行扫描电镜表征,结果如图 10 所示,光栅沟槽可以被完全沉积填满,光栅所在位置为图 10 中黑色方框位置,仔细观察可以发现方框中存在呈黑色的小圆点,这可能是个别过于尖锐的光栅沟槽侧面“小沟”的边角。

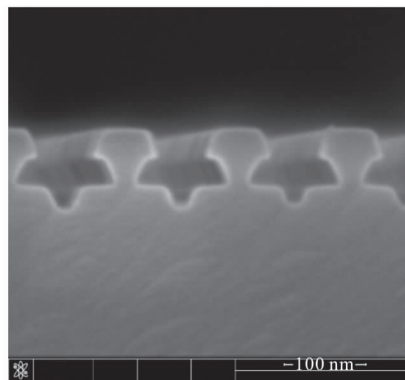


图 9 优化参数的光栅图形
Fig.9 Shape of grating for optimizing parameters

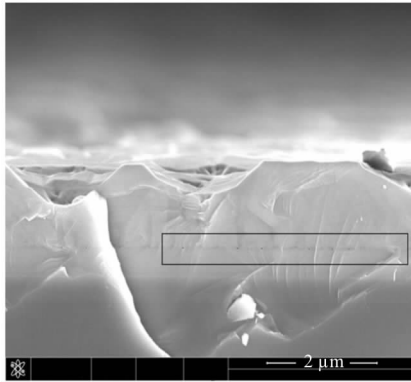


图 10 二次外延后的外延片截面图

Fig.10 Epitaxial wafer cross-section after re-growth

4 结 论

文中采用纳米压印技术并结合干法刻蚀和湿法腐蚀两种工艺制备出一种 808 nm 大功率半导体 DFB 激光器中结构新颖的梯形布拉格光栅,光栅周期为 120 nm,光栅深度约为 85 nm,占空比约为 47%,所制作的光栅边缘线条平直,表面光滑平整,周期性优良。利用纳米压印技术制作 DFB 激光器具有成本低、分辨率高、生产效率高等优势,创新型的引入的干法刻蚀之后的湿法腐蚀工艺以及腐蚀牺牲层保证了光栅表面的洁净度和后续二次外延的质量,为后续芯片的优良性能提供了有力的保证。

当然也存在不足之处,例如湿法腐蚀之后光栅沟槽底部存在的“小沟”,这是干法刻蚀工艺的时间过长,刻蚀深度过度导致,通过精准控制刻蚀时间可消除这些“小沟”;二次外延后光栅附近存在黑色的小圆点,这说明光栅沟槽侧面的“小沟”的边角过于尖锐,产生了缺陷,后续实验中还应该继续优化腐蚀液的成分、腐蚀液成分的配比,腐蚀温度和时间等条件,使腐蚀过程更加可控,在保证形貌和占空比合适的情况下,可以进一步提高光栅的质量。

参考文献:

- [1] Cao Yuxuan, Shu Shili, Sun Fangyuan, et al. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1003002. (in Chinese)
- [2] Guo Wentao, Tan Manqing, Jiao Jian, et al. 980 nm fiber grating external cavity semiconductor lasers with high side mode suppression ratio and high stable frequency[J]. *J of Semiconductors*, 2014, 35(8): 94-97.
- [3] Wen Ya, Wu Chunting, Yuan Zerui, et al. Research progress of far-infrared solid-state lasers [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6):889-900. (in Chinese)
- [4] Leng Yanbing, Dong Lianhe, Sun Yanjun. Study on 1×11 Damman grating with sub-wavelength structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 812-817. (in Chinese)
- [5] Lin Dongliang, Zhang Fang, Huang Huijie. Research of scanning slit with minimal penumbra of blades edge in lithography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1046-1053. (in Chinese)
- [6] Zhu Jinkui, Kang Weidong, Zeng Xiangwei, et al. Fabrication of bilayer metallic nano gratings in mid-infrared region based on flexible nanoimprint lithography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 67-71. (in Chinese)
- [7] Fu Shenghui, Zhong Yuan, Song Guofeng, et al. High power distributed feedback laser diodes emitting at 820 nm [J]. *J of Semiconductors*, 2006, 27(6): 966-969.
- [8] He Y, An H, Cai J, et al. 808 nm broad area DFB laser for solid-state laser pumping application[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(3): 163-164.
- [9] Qi Xiaodong, Ye Shujuan, Zhang Nan, et al. Surface-emitting distributed-feedback semiconductor lasers and grating-coupled laser diodes [J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(5): 415-431.
- [10] Schultz C M, Crump P, Maabdorf A, et al. In situ etched gratings embedded in AlGaAs for efficient high power 970 nm distributed feedback broad-area lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100 (20): 201115. (in Chinese)
- [11] Fricke J. DFB lasers with apodized surface gratings for wavelength stabilization and high efficiency [J]. *Semicond Sci Technol*, 2017, 32: 075012.
- [12] Zhang Qi, Zhao Yihao, Dong Zhen, et al. 980 nm high-power fundamental mode distributed-feedback laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0202004. (in Chinese)
- [13] Wang Haili, Jing Hongqi, Zhao Yihao, et al. Preparation for first-order grating of 975 nm distributed feedback semiconductor laser[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(4): 531-535. (in Chinese)
- [14] Mostallino R, Garcia M, Deshayes Y, et al. Thermal investigation on high power dfb broad area lasers at 975 nm, with 60% efficiency[C]//SPIE, 2016, 9733: 97330S-2.
- [15] Kazarinov R F, Henry C H. Second-order distributed feedback lasers with mode selection provided by first-order radiation loss [J]. *Urnal of Quantum Electronics*, 1985, 21(2): 143-149.